

Evaluación de la contaminación por escorrentía urbana: sedimentos depositados sobre la superficie de una vía

Evaluating urban runoff pollution: sediments deposited on a road surface

Carlos Alfonso Zafra Mejía¹, Javier Temprano González² y Iñaki Tejero Monzón³

RESUMEN

La contaminación causada por el agua de escorrentía constituye un gran problema en las áreas urbanas. El estudio del comportamiento de los sedimentos depositados sobre una superficie varía para determinar sus características de acumulación en tiempo seco y de lavado durante un evento de lluvia. Adicionalmente, permitirá establecer mecanismos de control de la contaminación asociada con el sedimento depositado en este tipo de superficies. En este artículo se presentan los datos del sedimento recolectado sobre la superficie de una vía en la ciudad de Torrelavega, al norte de España, durante un período de 65 días, en el que se recolectaron en total 132 muestras. El sistema de recolección del sedimento distinguió dos tipos de muestras: la aspirada directamente en seco (carga libre) y la recolectada tras un barrido después del aspirado (carga fija). Para cada tipo de muestra se determinó la carga de sedimento (g m^{-2}), la granulometría y la humedad. Los datos mostraron que la carga de sedimento y la disponibilidad al aspirado de la carga más fuertemente adherida a la superficie (carga fija) aumentan con el número de días de tiempo seco. La granulometría del sedimento recolectado tendió a ser más fina a medida que aumentó el tiempo seco. Los tamaños de partícula $< 125 \mu\text{m}$ presentaron la mayor tasa de acumulación en tiempo seco, y los $< 500 \mu\text{m}$ la mayor susceptibilidad al lavado durante una lluvia.

Palabras clave: granulometría, carga de sedimento, acumulación, lavado, suciedad urbana, escorrentía, calidad de agua.

ABSTRACT

The pollution caused by runoff water continues being a great problem in urban areas. Studying the behavior of sediments deposited on a road surface serves to determine the characteristics of their build-up during dry times and wash-off during rainy periods. It will also lead to establishing pollution control mechanisms associated with the sediment deposited on particular types of road surfaces. This paper presents data regarding the sediment accumulating on a road surface in the city of Torrelavega in northern Spain during a 65-day period, during which time 132 samples were collected. Two types of sediment collection samples were obtained: vacuumed dry samples (free load) and those swept up following vacuuming (fixed load). Sediment loading, particle size distribution and moisture were determined for each type of sample. The data showed that the sediment loading (gm^{-2}) and vacuumed availability of the load which adhered most strongly to the surface (fixed load) increased with the number of dry days. Collected sediment particle size distribution tended to be finer with the increase in the number of dry days. $< 125 \mu\text{m}$ particle sizes presented the greatest rate of build-up during dry time and those which were $< 500 \mu\text{m}$ had the greatest susceptibility to being washed off during rain.

Keywords: particle size distribution, sediment load, build-up, wash-off, urban dirt, runoff, water quality.

Recibido: junio 27 de 2008

Aceptado: marzo 2 de 2009

Introducción

La contaminación causada por el agua de escorrentía constituye un gran problema en las áreas urbanas, ya que se ha demostrado que contiene los mismos tipos de contaminantes que se encuentran en las aguas residuales urbanas. La escorrentía urbana se considera como una fuente de contaminación de difícil localización (difusa) pues se origina en áreas extensas, su vertido es intermitente ligado a un fenómeno aleatorio, la lluvia, variable en el tiempo,

difícil de muestrear en origen, y está relacionada con el uso del suelo (Novotny, 1994; Malgrat, 1995). La contaminación difusa es de interés creciente debido a sus efectos tóxicos, a la limpieza gradual de las fuentes puntuales de contaminación, y a las cantidades significativas de contaminantes descargados en los sistemas acuáticos (Dempsey et al., 1993).

En las vías se acumula de forma aleatoria y no uniforme gran cantidad de polvo y suciedad. Dicha acumulación depende del tiempo transcurrido desde la última limpieza natural (lluvia) o artificial (ba-

¹ Ingeniero civil. Especialista, Ingeniería Ambiental, Universidad Industrial de Santander, Colombia. M.Sc., en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Doctorando en Ingeniería Ambiental, Universidad de Cantabria, España. Profesor Asistente, Ingeniería Ambiental, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. czafra@udistrital.edu.co

² Ingeniero de caminos, canales y puertos. Ph.D., en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, España. Profesor Titular, Ingeniería Ambiental, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, Santander, España. tempranoj@unican.es

³ Ingeniería de caminos, canales y puertos. Ph.D., en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España. Catedrático y líder, grupo de Investigación en Ing. Ambiental-GIA, Ingeniería Ambiental, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria, España. tejeroi@unican.es

rrido o lavado). Los sedimentos acumulados sobre las superficies impermeables en períodos de tiempo seco llevan consigo nutrientes, metales y otras sustancias que pueden afectar la calidad del aire del entorno, y los recursos hídricos cuando son transportados por la escorrentía (Temprano y Tejero, 2002; Berhanu *et al.*, 2007); ahí la gran importancia de estudiar su comportamiento en las áreas urbanas.

Las cargas de contaminación de la escorrentía urbana son producto de la acumulación de los sedimentos contaminados entre dos lluvias consecutivas. Estas cargas por lo general tienden a un umbral o valor máximo de equilibrio. La acumulación de la suciedad sobre una superficie se estima en función del número de días de tiempo seco como una función lineal, potencial, exponencial o Michaelis-Menton (ASCE, 1992). En el tiempo seco intervienen procesos tales como: la eliminación por la acción del viento y por las corrientes de aire generadas por el tráfico, limpieza viaria, deposición atmosférica, adsorción y oxidación de químicos de un estado a otro, y otros imponderables (Huber y Dickinson, 1988; Debo y Reese, 1995). Las partículas finas de polvo pueden viajar por efecto del viento muchos kilómetros antes de depositarse sobre la superficie, y son dichas partículas las que transportan la mayor cantidad de contaminantes (Sartor y Boyd, 1972; Deutsch, 1989). La mayoría de las investigaciones (e. g., Sartor y Boyd, 1972; ASCE, 1992; Viklander, 1998; Zafra *et al.*, 2007) muestran que los contaminantes están generalmente más concentrados en las fracciones de menor diámetro. Dempsey *et al.* (1993) concluyen que el diseño de mejores prácticas de control (MPC) debe ir encaminado a eliminar la fracción de menor tamaño.

Existen dos mecanismos que parecen actuar simultáneamente en el transporte del sedimento en tiempo de lluvia: en el primero, el material en forma de partícula se desagrega por el impacto directo del agua de lluvia que cae (Huber, 1992). En el segundo, la fracción soluble va en disolución y las posteriores gotas de lluvia originan una turbulencia que favorece la mezcla y proporciona un aporte continuo de disolvente limpio (Whipple, 1983; U. S. EPA, 1993). La intensidad de la lluvia, las características de las superficies de las calles y el tamaño de las partículas son los principales factores de que depende la tasa con que la lluvia lava el polvo y la suciedad acumulada sobre las vías (Sartor y Boyd, 1974).

La concentración de los contaminantes asociados con los sedimentos acumulados sobre las vías urbanas es generalmente superior a la que ocurre en áreas comerciales y residenciales. Los contaminantes más comunes son: aceites, combustibles, fluidos hidráulicos, polvo, arena y sal. Se pueden encontrar metales pesados originados por la corrosión de los materiales cromados o galvanizados, y por las emisiones atmosféricas de vehículos, mobiliario urbano e industrias (Cole, 1984). El deterioro de los pavimentos contribuye sólo con una pequeña fracción de la masa contaminante en las vías (Asplund, 1982).

Los diversos tipos de fuentes de contaminación presentan gran variedad en su tamaño. Por ejemplo, el uso de llantas supone el desprendimiento de partículas con un diámetro medio de 20 μm (Kobringer y Geinopolos, 1984). El 57% del plomo emitido por el escape de los vehículos está asociado con partículas de diámetro $>9 \mu\text{m}$ (Habibi, 1973). Es de gran importancia estudiar el comportamiento y cuantificar la cantidad de contaminación asociada según el tamaño de la partícula, para poder tener una buena efectividad en el diseño de los mecanismos de control de la contaminación (MPC).

El barrido viario ha sido considerado como un mecanismo de limpieza para remover contaminantes. Sin embargo, su validez es

muy cuestionable. El barrido de las vías remueve solamente el 15% de la fracción $<45 \mu\text{m}$ y el 48% de la fracción $<246 \mu\text{m}$ (Sartor y Boyd, 1972), y en general partículas entre 75-3000 μm (Valiron y Tabuchi, 1992). La efectividad en la limpieza viaria depende de muchos factores tales como el tipo de barredora, si el lavado está incluido, la presencia de zonas de parqueo, la cantidad total de sedimento, el constituyente que está siendo considerado y la frecuencia de los eventos de lluvia (Pitt, 1979). En el presente estudio el barrido viario no fue considerado como un mecanismo de limpieza durante el período de muestreo. Sólo se consideró la lluvia como mecanismo de limpieza.

Manning *et al.* en 1977 realizaron un estudio sobre las tasas de acumulación (tipo lineal) de polvo y suciedad en diferentes usos del suelo, para establecer cuántos kg día^{-1} de un contaminante determinado se habían acumulado. En realidad esto no significa que otros contaminantes se encuentren asociados o adheridos a los sedimentos; simplemente afirman que se pueden utilizar los sedimentos o sólidos como un indicador de la presencia de otros contaminantes (Huber y Dickinson, 1988). Las investigaciones han demostrado que es una buena aproximación, especialmente para los contaminantes que tienen afinidad iónica por las partículas de suelo arcilloso (Collins y Ridgway, 1980; Whipple, 1983).

El objetivo principal del presente artículo es analizar el comportamiento de los sedimentos depositados sobre la superficie de una vía urbana. Se pretenden identificar los principales factores que intervienen en los fenómenos de acumulación y lavado de los sedimentos depositados. Este artículo inicia con un análisis del fenómeno de acumulación de sedimento sobre superficies viarias, enfatizando en la carga superficial (g m^{-2}) y su distribución granulométrica. Finalmente, se presenta un análisis del fenómeno de lavado de la carga superficial de sedimento en tiempo de lluvia.

Materiales y métodos

Descripción del lugar

El lugar de investigación se ubicó en el Bulevar Ronda Rufino Peón en la ciudad de Torrelavega (Cantabria). Su clima atlántico (templado) se caracteriza por las lluvias abundantes a lo largo de todo el año (precipitación media anual de 1230 milímetros; días de precipitación por año: 188), la elevada humedad y la suavidad de las temperaturas.

El área de estudio se encuentra localizada en el interior de una cuenca de uso residencial, rodeada por áreas abiertas y poco edificadas. El bulevar cuenta en cada uno de sus dos sentidos con un carril para el tráfico, uno para aparcamiento y otro para el tránsito de las bicicletas. El carril para las bicicletas está separado de la calzada por un bordillo de concreto y una línea de vegetación (Figura 1). El sistema de desagüe de la calzada está constituido por una cuneta lateral en concreto, sobre la cual se sitúa una serie de imbornales cada cuarenta metros. El bulevar da acceso a áreas residenciales, pero es usado frecuentemente por vehículos de tipo comercial. El área de estudio se dividió en dos zonas cuyas características principales se muestran en la Tabla 1.

Sistema de muestreo

Las muestras de la calzada se tomaron en días de tiempo seco, a un costado de la cuneta, a la misma hora y durante un período de 65 días (28/09/04-01/12/04). La superficie de muestreo tenía un área de 0.49 m^2 (0.70 m x 0.70 m). Las dimensiones del área de muestreo se garantizaron colocando sobre la superficie un marco de acrílico de idénticas dimensiones que las del área de muestreo.

En la recolección del sedimento se utilizó un aspirador de 1.5 kW de potencia. Se controló el lugar de muestreo para evitar repetir y estar cerca de anteriores puntos de recolección.

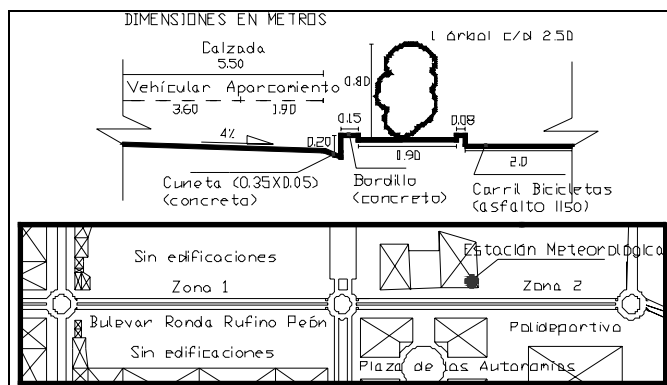


Figura 1. Esquema del área de estudio

Tabla 1. Principales características de cada zona

Característica	Zona 1	Zona 2
Densidad residencial	Baja	media
Líneas de tráfico	2 ^a	2 ^a
Líneas de aparcamiento	2 ^{ab}	2 ^a
Longitud (m)	300	310
Pendiente longitudinal (%)	0.2	4
Pendiente transversal (%)	4	4
Capa de rodadura/textura	Asfalto/rugoso	Asfalto/rugoso
Densidad media de tráfico (Vehículos día ⁻¹)	3800	3800
Densidad máxima de tráfico (Vehículos h ⁻¹)	600	600
Velocidad promedio (km h ⁻¹)	55-60	55-60
Composición (%)	coches: 92; camionetas: 5; camiones sin remolque: 2.5; camiones con remolque: 0.25; autobuses: 0.25	

Nota: a: una en cada sentido; b: subutilizadas por la baja densidad residencial.

Dos tipos de muestras fueron recolectadas sobre la calzada de cada zona. La primera muestra correspondió a la aspirada directamente sobre la superficie de muestreo, la cual se llamó “carga libre” (CL). Seguidamente, la misma superficie fue barrida con un cepillo de fibras para que los sedimentos adheridos a la misma estuvieran disponibles para ser aspirados; al sedimento recolectado después del barrido se le llamó “carga fija” (CF). La superficie de muestreo fue barrida ligeramente para evitar el desprendimiento de partículas pertenecientes al pavimento, e intentando aplicar el mismo esfuerzo sobre el cepillo durante todo el período de muestreo. La “carga total” (CT) depositada sobre la superficie está constituida por la suma de la “carga libre” y la “carga fija.” La cantidad total de muestras recolectadas sobre la calzada fue de 112; 56 por cada zona (28 muestras de “carga libre” y 28 muestras de “carga fija”).

Con el fin de estudiar la distribución del sedimento a través de la vía, en veinte ocasiones durante el período de estudio se recolectaron muestras de la cuneta y el carril para las bicicletas conservando el mismo alineamiento horizontal del sitio de muestreo de la calzada. En la recolección de estas muestras se siguió el procedimiento descrito anteriormente, pero en esta ocasión no se diferenciaron los dos tipos de cargas (libre y fija).

Los datos meteorológicos de precipitación, temperatura, velocidad y dirección del viento fueron tomados de una estación climatológica administrada por la Universidad de Cantabria, localizada a pocos metros del área de estudio (Figura 1).

Análisis de laboratorio

Para determinar la humedad del sedimento recolectado se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM D2216 (2000).

La granulometría del sedimento se determinó usando el método ISO 2591 (2000). Solamente un 50% de las muestras de las partículas menores de 125 μm fueron tamizadas en húmedo. El método de tamizado en húmedo fue empleado porque no tiende a subestimar la fracción más fina del sedimento recolectado. El rango de la serie de tamices utilizada para el análisis granulométrico estuvo comprendido entre 63-2.800 μm .

Resultados y discusión

La Figura 2 presenta la precipitación diaria y la variación de las diferentes cargas analizadas (total, libre y fija), para la calzada de la zona 1 durante el período de muestreo. Un comportamiento similar registraron las cargas de la zona 2.

I. Acumulación del sedimento

Cargas

Se presentaron 11 intervalos de tiempo seco durante el período de muestreo (Figura 2), 6 de los cuales fueron superiores a 1 día: 24/09/04-01/10/04 (7 días), 03-05/10/04 (3 días), 09-13/10/04 (5 días), 22-24/10/04 (3 días), 17-18/11/04 (2 días), y 22-27/11/04 (6 días). En todos ellos se observó un claro aumento de la carga total de sedimento (g m^{-2}) a medida que pasaban los días de tiempo seco.

Al estudiar la carga total acumulada sobre la calzada en función del número de días de tiempo seco, se apreció que la relación lineal era la más adecuada. El coeficiente de correlación (R^2) para las zonas 1 y 2 fue de 0,82 y 0,83, respectivamente. Los modelos lineales obtenidos para las zonas 1 y 2 fueron los siguientes:

$$DD1 = 1.64 * t \text{ (i)}$$

$$DD2 = 2.53 * t \text{ (ii)}$$

Donde DD1 y DD2 representan la carga total de sedimento (g m^{-2}) acumulado sobre la superficie de las zonas 1 y 2, respectivamente; y t representa el número de días de tiempo seco entre dos eventos consecutivos de lluvia. Sartor y Boyd (1972), Saheen (1975) y Ball et al. (1988) muestran que la carga total de sedimento (g m^{-2}) acumulada en tiempo seco tiende a un valor máximo de equilibrio. Los resultados en el presente estudio mostraron que no existía tendencia hacia una condición de equilibrio en la cantidad acumulada de sedimento, debido probablemente a la frecuencia de los eventos de lluvia (Figura 2).

La carga total media, depositada por día de tiempo seco sobre la calzada, fue de 1,2 g m^{-2} en la zona 1 y de 2,7 g m^{-2} en la zona 2. La diferencia existente en la densidad residencial y la mayor exposición a la acción del viento de la zona 1 sugieren la inferior carga total depositada en tiempo seco sobre la misma (velocidad media del viento durante el período de muestreo: 8 km h^{-1}). Ball et al. (1988) encontraron que velocidades del viento superiores a 21 km h^{-1} producían una resuspensión de las partículas acumuladas sobre la calzada, y Barkdoll et al. (1977) mostraron que una partícula de 246 μm podía ser resuspendida por masas de aire con velocidades superiores a 8.05 km h^{-1} .

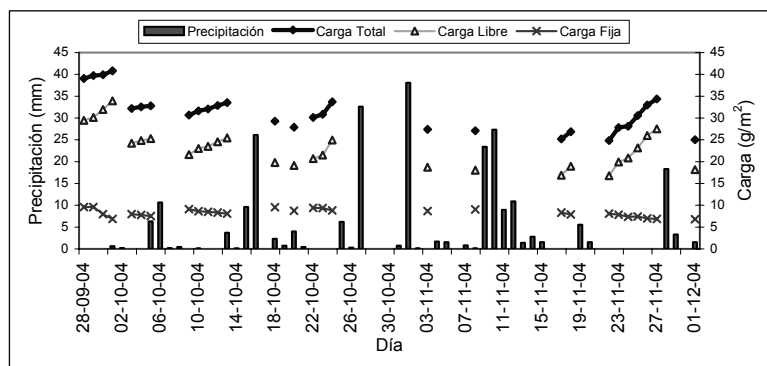


Figura 2. Cargas sobre la calzada de la zona 1

Si se representa CF/CL frente al tiempo se observa que al aumentar el número de días de tiempo seco disminuye la relación CF/CL. Los análisis mostraron que la relación lineal es la más adecuada. Por ejemplo, para los períodos de tiempo seco del 22-27/11/04 (6 días) y 9-13/10/04 (5 días) los coeficientes de correlación (R^2) en la zona 1 fueron de 0,96 y 0,95, respectivamente. El coeficiente de correlación para todos los períodos de tiempo seco en las zonas 1 y 2 fue de 0,52 y 0,48, respectivamente. Probablemente dicha tendencia se debió a la influencia de factores climatológicos (temperatura, humedad, viento, etc.) que hicieron que la carga más adherida a la superficie, la carga fija, estuviera más disponible al aspirado y formara parte de la carga libre; adicionalmente, el aporte del propio fenómeno de acumulación de polvo y suciedad sobre la vía causó un notable incremento de la carga libre.

La humedad media del sedimento recolectado durante los períodos de tiempo seco fue mayor para la carga fija: 2,9%; mientras que para la carga libre fue del 0,6%. Como era de esperar, la humedad del sedimento disminuía con el aumento del número de días de tiempo seco e influía en la disponibilidad de la carga fija para ser aspirada. Los resultados sugieren que la disponibilidad al aspirado de la carga más fuertemente adherida a la superficie (especialmente la carga fija) aumenta con el número de días de tiempo seco, y que al programar la frecuencia de las labores de limpieza viaria, conviene tener en cuenta el efecto que tienen sobre la carga de sedimento dichos períodos de tiempo.

La cantidad de sedimento acumulado sobre la calzada, por metro lineal, se comparó con el acumulado sobre la cuneta y el carril para las bicicletas con objeto de cuantificar la distribución del sedimento a través de la vía (Tabla 3). Como se puede observar, el porcentaje de sedimento acumulado sobre el carril de las bicicletas con respecto al total representó el 6% y 24% para la zona 1 y la zona 2, respectivamente. Los resultados sugieren que la distribución del sedimento a través de la vía no es uniforme y se encuentra influenciada por la existencia de barreras naturales (senda de vegetación) o artificiales (bordillo), las cuales impiden el transporte del sedimento de un lugar a otro (Figura 1).

Granulometría

La Tabla 2 presenta la distribución media por tamaños para la carga total (CT), la carga libre (CL) y la carga fija (CF) del sedimento recolectado sobre la calzada de cada zona.

Se observó la existencia de pequeñas variaciones en la distribución granulométrica de las muestras, pero en general, sus características fueron similares. La envolvente de la distribución de los tamaños para la carga fija fue más estrecha que la de la carga libre, indicando una menor variabilidad en el tamaño de las partículas para la carga fija. Los análisis granulométricos mostraron que el 84% de

la carga libre era $<1000 \mu\text{m}$ y el 8% $<63 \mu\text{m}$. Como se esperaba, la carga fija fue mucho más fina. El 98% era $<1000 \mu\text{m}$ y un 29% $<63 \mu\text{m}$. Al analizar la carga total se apreció que el 87% de las partículas eran $<1000 \mu\text{m}$ y un 13% $<63 \mu\text{m}$ (Tabla 2). Sartor y Boyd (1972) mostraron que el 5,9% de las partículas eran $<43 \mu\text{m}$ y el 56,5% $>246 \mu\text{m}$, con respecto a la muestra total. Vaze y Chiew (2002) encontraron que el porcentaje de las partículas $<100 \mu\text{m}$ era de un 10% y 15% para la carga libre y la carga fija, respectivamente. La variación entre autores en la distribución granulométrica de los sedimentos recolectados sobre la calzada se debe principalmente a las características particulares de cada lugar de muestreo y a la eficiencia de los diferentes métodos empleados en la recolección del sedimento (aspirado en seco, barrido en seco, aspirado y barrido en seco, y lavado y aspirado simultáneo). Sin embargo, los resultados son coherentes con los del presente estudio.

Las partículas $<125 \mu\text{m}$ fueron tamizadas en húmedo para cuantificar de mejor manera la fracción más fina del sedimento recolectado. Los resultados mostraron que las partículas $<63 \mu\text{m}$ están subestimadas por el método de tamizado en seco en un 10,1% para la carga libre y en un 14,6% para la carga fija, de las muestras recolectadas sobre la calzada. Dicha diferencia sugiere que parte de la fracción más fina del sedimento se encuentra aglomerada o adherida a partículas de tamaño mayor, y existe la posibilidad de que sean desprendidas durante un evento de lluvia. Igualmente, Viklander (1998) encontró diferencias entre los dos métodos de tamizado (en seco y en húmedo), haciéndose más evidente en las partículas $<75 \mu\text{m}$.

Las partículas del sedimento recolectadas sobre la superficie de la calzada exhibieron una distribución Log-normal positivamente sesgada. El sedimento recolectado sobre la superficie de la cuneta y el carril para las bicicletas presentó una distribución semejante de las partículas. Ellis y Revitt (1982), y Ball et al. (1988) hallaron una distribución similar de las partículas en un estudio del sedimento acumulado sobre las superficies de calzadas y cunetas. En la Tabla 3 se presentan el d10, d50, d90 (percentil) y las cargas para las muestras recolectadas sobre la calzada (CT, CL y CF) y en los diferentes elementos que componen la vía (CT).

La granulometría del sedimento recolectado en los elementos que componen la vía (calzada, cuneta y carril para las bicicletas) mostró diversas tendencias. La distribución granulométrica de las partículas acumuladas sobre la calzada tendió a ser más gruesa que la observada en la cuneta y el carril para las bicicletas. Para la zona 1 el d50 en la calzada fue de $247 \mu\text{m}$, en la cuneta de $193 \mu\text{m}$ y en el carril para las bicicletas de $129 \mu\text{m}$ (Tabla 3). Se notó una tendencia similar en la zona 2. Los resultados sugieren que el bordillo y la franja de vegetación en la vía actúan como una barrera para las partículas más gruesas, que no han obtenido la fuerza necesaria por parte del tráfico (impacto de las llantas) para ser proyectadas y sobrepasarla, explicando así la distribución más fina de tamaños en el carril para las bicicletas. Por otra parte, la línea de aparcamiento (1,90 m de ancho) y la textura rugosa de la superficie de rodadura hace que se requiera por parte del tráfico una mayor fuerza para proyectar las partículas más gruesas hasta la cuneta, lo que explica la distribución más fina de tamaños sobre la misma. También hay que tener en cuenta que muchas partículas, especialmente las más finas, pueden ser desplazadas por la turbulencia generada por el tráfico vehicular y ser depositadas en zonas adyacentes, aminorando la cantidad de partículas finas en ciertas áreas y aumentando la de otras.

Tabla 2. Granulometría del sedimento recolectado sobre la calzada de las zonas 1 y 2

Zona	Lugar	Tipo de carga	Diámetro en μm - Porcentaje de partículas de diámetro menor al indicado						
			< 63	< 125	< 250	< 500	< 1000	< 2000	< 2800
(1) ^a	Calzada	CT	12,2 \pm 0,7	30,0 \pm 1,6	50,2 \pm 1,9	70,5 \pm 1,8	86,0 \pm 1,3	96,1 \pm 0,6	100,0
		CL	6,8 \pm 0,7	19,6 \pm 1,8	39,4 \pm 2,6	62,6 \pm 2,7	81,5 \pm 2,0	94,7 \pm 0,8	100,0
		CF	27,4 \pm 1,3	59,5 \pm 2,1	80,1 \pm 1,6	92,0 \pm 0,8	97,9 \pm 0,2	100,0	
(2) ^a	Calzada	CT	11,4 \pm 1,1	27,4 \pm 2,0	48,9 \pm 2,2	70,1 \pm 1,9	86,1 \pm 1,2	95,7 \pm 0,7	100,0
		CL	6,5 \pm 0,9	17,9 \pm 1,8	38,7 \pm 2,8	62,3 \pm 2,9	81,9 \pm 1,7	94,2 \pm 1,1	100,0
		CF	26,8 \pm 1,9	56,7 \pm 3,0	79,4 \pm 2,2	92,3 \pm 1,0	98,2 \pm 0,3	100,0	

Nota: a: Promedio sobre la totalidad del período de muestreo.

Tabla 3. Cargas, d_{10} , d_{50} , y d_{90} para las diferentes muestras recolectadas

Zona	Lugar	Tipo de carga	Percentil (diámetro en μm)			Carga (g m^{-2})	Carga ($\text{g m}^{-1}\text{c}$)	Carga ($\%\text{m}^{-1}$)
			d_{10}	d_{50}	d_{90}			
(1) ^a	Calzada	CT	50	268	1451	31.8 \pm 4.5	22.3 \pm 3.2	100
		CL	75	352	1652	23.6 \pm 4.6	16.5 \pm 3.2	74
		CF	13	97	702	8.2 \pm 1.0	5.7 \pm 0.7	26
(2) ^a	Calzada	CT	53	280	1466	30.1 \pm 3.8	21.1 \pm 2.7	100
		CL	78	359	1661	21.0 \pm 3.9	14.7 \pm 2.7	70
		CF	15	103	709	7.0 \pm 2.9	4.9 \pm 3.4	30
(1) ^b	Calzada	CT	41	247	1472	30.5 \pm 4.7	21.4 \pm 3.3	14
	Cuneta	CT	31	193	1184	344.1 \pm 26.6	120.4 \pm 9.3	80
	Carril bicicletas	CT	17	129	996	13.1 \pm 2.5	9.2 \pm 1.8	6
(2) ^b	Calzada	CT	54	295	1615	29.7 \pm 3.3	20.8 \pm 2.3	62
	Cuneta	CT	48	270	1508	13.0 \pm 5.5	4.6 \pm 1.9	14
	Carril bicicletas	CT	22	150	1056	12.0 \pm 1.7	8.4 \pm 1.2	24

Nota: a: Promedio sobre la totalidad del período de muestreo; b: Promedio sobre diez observaciones; c: Para la calzada y el carril de las bicicletas sobre una franja de 0.70 m de ancho.

Sartor y Boyd (1972), Grottker (1987), Debo y Reese (1995), y Deletic y Orr (2005) encontraron que la distribución del sedimento acumulado a través de la calzada no era uniforme y dependía de la distancia entre el sitio de muestreo y el bordillo de la vía. Estos atribuyeron dicha variación al tráfico vehicular por impacto directo y por las corrientes de aire generadas, y al efecto de barrera ejercido por el bordillo. Deletic y Orr (2005) estudiaron la variación de la distribución granulométrica de las partículas a través de la calzada en función de la distancia entre el bordillo y el lugar de muestreo, encontrando, que la distribución granulométrica dependía principalmente de la posición a través de la calzada, y que el d_{50} de las muestras disminuía con el aumento de la distancia entre el bordillo y el lugar de muestreo. El d_{50} de las muestras recolectadas por Deletic y Orr (2005) al lado y a 0,75 m del bordillo fue de 397 μm y 238 μm , respectivamente.

En promedio, en las dos zonas de estudio, el 72% de la carga total recolectada durante el período de muestreo correspondió a la carga libre. La eficacia en la recolección del sedimento por aspiración aumentó con el diámetro de la partícula (Tabla. 4). Se probaron varios modelos de regresión y el que produjo los mejores resultados fue el potencial ($R^2=0,92$). Al aplicar una operación adicional de barrido y aspirado sobre la misma superficie (carga fija) se incrementó considerablemente la eficacia en la recolección de la fracción más fina del sedimento. Los resultados sugieren que es necesario combinar adecuadamente las técnicas de barrido y aspirado para obtener buenos resultados en la recolección de la

fracción más fina del sedimento acumulado sobre las superficies viarias.

La granulometría del sedimento recolectado sobre la calzada de la zona 1 tendió a ser más fina a medida que aumentó el número de días de tiempo seco. Se distinguieron tres grupos de tamaños de partículas según su tendencia de acumulación. El primer grupo estuvo conformado por los tamaños de partícula $<125 \mu\text{m}$, en los que se apreció la mayor tasa de acumulación ($0,88 \pm 0,21 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). El segundo grupo, con una tasa menor de acumulación ($0,45 \pm 0,18 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), estuvo conformado por los tamaños de partícula $>125 \mu\text{m}$ y $<2.000 \mu\text{m}$. El último grupo, con una tasa de acumulación negativa ($-0,13 \pm 0,07 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), estuvo conformado por la fracción comprendida entre 2.000-2.800 μm . En la zona 2 se observó un comportamiento similar. La tasa de acumulación en la zona 2 para los tres grupos de tamaño fue de $2,18 \pm 0,53 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $0,84 \pm 0,23 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y $-0,32 \pm 0,14 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente. Los resultados sugieren que el aumento en tiempo seco de la fracción más fina del sedimento está probablemente ocasionado por la trituration a que es sometida la fracción más gruesa por parte del tráfico, lo que explicaría la tasa de acumulación negativa de la fracción de mayor tamaño. Por otro lado, el fenómeno de acumulación de polvo y suciedad sobre la calzada aporta fundamentalmente partículas muy finas. Algunos investigadores han encontrado resultados similares, es el caso de Ellis y Revitt (1982) y Viklander (1998), quienes reportaron la relación existente entre la densidad de tráfico y el grado de trituration de las partículas acumuladas sobre la superficie de la calzada.

Lavado del sedimento

Cargas

Diez períodos de lluvia ocurrieron durante el muestreo (Tabla 5). La altura total de precipitación durante el período de muestreo correspondió a un 29% de la precipitación total registrada para el mismo año (872 mm).

Tabla 4. Eficacia en la recolección de la carga total por aspiración para las zonas 1 y 2

Zona	Lugar	Tipo de carga	% de la carga total recolectada por aspiración - Diámetro en μm						
			< 63	< 125	< 250	< 500	< 1000	< 2000	< 2800
(1) ^a - (2) ^a	Calzada	CL	42,6 \pm 0,7	49,4 \pm 1,0	59,3 \pm 0,8	66,6 \pm 0,6	70,8 \pm 0,8	73,3 \pm 0,9	100

Nota: a: Promedio sobre la totalidad del período de muestreo

La pérdida de sedimento (carga total) en la calzada de la zona de menor pendiente estuvo entre el 1-1,20-3%, y en la zona de pendiente mayor, entre el 1-37,4%, demostrando así la influencia de la pendiente en el lavado de la carga de sedimento (g m^{-2}).

Se observó que uno de los principales factores que intervienen en el fenómeno de lavado es el período previo de tiempo seco. Por ejemplo, en la zona de menor pendiente para 1 día previo de tiempo seco, la lluvia del 7-15/11/04, con una precipitación de 77,1 mm, lavó aproximadamente un 6,9% de la carga total acumulada, mientras que para 6 días previos de tiempo seco, la lluvia del 28-29/11/04, con una precipitación menor, de 21,6 mm, lavó aproximadamente un 20,3% de la carga total acumulada (Tabla 5). También se observó que la altura total de precipitación es un fac-

tor a tener en cuenta en el fenómeno de lavado. Por ejemplo, en la zona de menor pendiente para el mismo período previo de tiempo seco, 1 día, la lluvia del 7-15/11/04, con una precipitación de 77,1 mm, lavó aproximadamente un 6,9% de la carga total, mientras que la del 4-7/11/04, con una precipitación menor, de 4.0 mm, lavó aproximadamente un 1% de la carga total acumulada

(Tabla 5). Los resultados sugieren que los principales factores que intervienen en el fenómeno de lavado, en el presente estudio, son el período previo de tiempo seco y la altura total de precipitación, y que el porcentaje del lavado de sedimento aumenta con el número de días previos de tiempo seco y con la altura total de precipitación.

Tabla 5. Datos climatológicos, d_{10} , d_{50} y d_{90} para los diferentes períodos de lluvia

Período Fecha (2004)	Período Seco Previo (días)	Precipitación h (mm)	Duración D (horas)	Zona 1; pendiente: 0.2%				Zona 2; pendiente: 4%			
				d_{10}	d_{50}	d_{90}	Lavado (% CT)	d_{10}	d_{50}	d_{90}	Lavado (% CT)
				dx(antes del período de lluvia):dx(después del período de lluvia); Diámetro en μm							
1-2/10	7	0.8	1.2	52:54	278:284	1497:1503	13.5	42:54	249:271	1467:1357	15.6
5-8/10	3	17.5	15.7	37:55	212:288	1212:1504	15.9	51:69	273:336	1478:1643	25.1
13-17/10	5	39.5	17.8	45:50	250:274	1380:1519	12.7	60:62	297:303	1460:1499	11.0
18-19/10	1	3.0	2.5	50:57	274:290	1519:1490	4.8	62:69	303:333	1499:1621	3.8
20-21/10	1	4.4	1.8	57:51	290:276	1490:1482	-	69:60	333:288	1621:1386	-
25/10-2/11	3	78.0	21.0	50:64	271:336	1467:1759	18.8	43:53	262:277	1582:1438	25.8
4-7/11	1	4.0	4.8	64:75	336:369	1759:1645	1.1	53:74	277:339	1438:1550	1.0
7-15/11	1	77.1	30.2	75:83	367:236	1793:1364	6.9	74:80	339:364	1550:1653	10.4
19-20/11	2	7.0	3.8	40:42	227:238	1277:1344	7.6	52:60	267:293	1367:1429	11.6
28-29/11	6	21.6	8.2	38:68	224:330	1310:1603	20.3	27:58	180:283	1197:1384	37.4

Se realizaron análisis de regresión combinando los factores climatológicos expuestos anteriormente, período previo de tiempo seco (t) en días y la altura total de precipitación (h) en mm.

$$F(x) = f(t * h) \text{ (iii)}$$

La función exponencial fue la que mejores resultados produjo. El coeficiente de correlación (R^2) fue de 0,52 y 0,43 para la zona 1 y la zona 2, respectivamente. No se observó ninguna relación entre la intensidad y duración de la lluvia, con el porcentaje de lavado de sedimento.

El único evento de lluvia en el que no se detectó lavado del sedimento fue el quinto (20-21/10/04; precipitación: 4,4 mm), posiblemente debido a la disminución en el período previo de tiempo seco producto del incremento en la frecuencia de las lluvias (Tabla 5). Los resultados sugieren que al aumentar la frecuencia de las lluvias la cantidad remanente de sedimento sobre la superficie de la calzada será menor y, por tanto, se requerirá un mayor esfuerzo en la limpieza del mismo.

La carga total de sedimento sobre la calzada se comparó con la de la cuneta, con el objeto de cuantificar la distribución del sedimento sobre la vía en tiempo de lluvia. La distribución del sedimento a través de la vía fue de un 14% para la calzada y de un 80% para la cuneta en la zona 1. Para la zona 2 la distribución fue de 62% para la calzada y 14% para la cuneta (Tabla 3). Es importante resaltar que las superficies de la calzada y la cuneta son de asfalto y concreto, respectivamente. Como se puede observar, en la zona de menor pendiente (0,2%) el porcentaje de sedimento acumulado sobre la cuneta es 5,7 veces mayor que el de la calzada. Por el contrario, en la zona 2, con una pendiente mayor (4%), el porcentaje de sedimento acumulado en la cuneta con respecto al de la calzada es 4,4 veces menor. Como era de esperar en vías de similares características (Tabla 1), en tiempo de lluvia la distribución del sedimento está altamente influenciada por la pendiente de la misma. Los resultados sugieren que la pendiente determina, en tiempo de lluvia, la distribución de las cargas remanentes sobre la superficie de la vía.

Granulometría

La granulometría del sedimento recolectado sobre la superficie de la calzada es mucho más gruesa que la hallada por algunos investigadores en los sedimentos transportados por la escorrentía. Stahre et al. (1990) encontraron que sólo el 30% de todos los SST en peso presentes en el agua de escorrentía tienen diámetros de partícula $>31 \mu\text{m}$ y un 93% $<45 \mu\text{m}$. Los resultados sugieren que las partículas más gruesas del sedimento se desagregan por el impacto directo del agua de lluvia que cae, y que la fracción fina es más susceptible de ser transportada por el flujo de agua superficial.

Se analizó la susceptibilidad al lavado del sedimento en función del diámetro para todos los eventos de lluvia durante el período de muestreo. Como era de esperar, a medida que disminuía el tamaño de la partícula y aumentaba la pendiente de la vía, crecía la posibilidad de transporte o lavado. Los resultados muestran que los tamaños de partícula que presentan mayor susceptibilidad al lavado son los $<500 \mu\text{m}$ (Tabla 6).

Tabla 6. Pérdida de sedimento por fracción de tamaño para todos los eventos de lluvia

Zona	Pendiente (%)	No. de Obs.	Pérdida de sedimento según el diámetro indicado (%)			
			$< 63 \mu\text{m}$	63-125 μm	125-250 μm	250-500 μm
1	0.2	10	27 \pm 12	21 \pm 9	18 \pm 7	17 \pm 6
2	4	10	40 \pm 13	30 \pm 19	23 \pm 14	15 \pm 14

La granulometría de la carga total tras los eventos de lluvia fue más gruesa, excepto para el evento del 20-21/10/04, el cual no produjo lavado de la carga de sedimento (Tabla 5). El comportamiento de la carga libre y la carga fija fue similar, aunque el efecto de lavado en esta última fue menor. Por ejemplo, la lluvia del 28/11/04 redujo el porcentaje de partículas $<500 \mu\text{m}$ en un 15% para la carga libre y en un 5% para la carga fija, en la zona de mayor pendiente. Al comparar la distribución granulométrica de las zonas 1 y 2, se observa que la granulometría es ligeramente más gruesa en la zona de mayor pendiente, probablemente porque el fenómeno de lavado es más efectivo a medida que aumenta la misma.

Conclusiones

Acumulación del sedimento

Cargas

Los datos obtenidos señalan que la carga total (g m^{-2}) aumenta al hacerlo el número de días de tiempo seco. Los análisis de regresión indican que la relación lineal es la más adecuada. Sin embargo, Sartor y Boyd (1972), Saheen (1975) y Ball et al. (1988) manifiestan que la carga total acumulada en tiempo seco tiende a un valor máximo de equilibrio. La disponibilidad al aspirado de la carga más fuertemente adherida a la superficie, la "carga fija", aumenta con el número de días de tiempo seco. Los análisis de regresión denotan que la relación lineal es la más adecuada para explicar dicha tendencia.

La humedad media del sedimento recolectado durante los períodos de tiempo seco es de 2,9% y 0,6% para la carga fija y la carga libre, respectivamente. La humedad del sedimento disminuye con el aumento del número de días de tiempo seco e influye en la disponibilidad de la carga fija para ser aspirada.

La distribución de la carga total de sedimento (g m^{-2}) a través de la vía no es uniforme y se encuentra influenciada por la existencia de barreras naturales (senda de vegetación) o artificiales (bordillo). Igualmente, Deletic y Orr (2005) encontraron que la carga de sedimento acumulado a través de la calzada no es uniforme y depende de la distancia entre el sitio de muestreo y el bordillo de la vía.

Granulometría

La carga más fuertemente adherida a la superficie, la "carga fija", es mucho más fina que la "carga libre". Cerca del 27% de la carga fija es $<63 \mu\text{m}$. Vaze y Chiew (2002) apreciaron que el porcentaje de partículas $<100 \mu\text{m}$ es del 15% para la carga fija, y Sartor y Boyd (1972) que el 5,9% de la carga total acumulada es $<43 \mu\text{m}$. La granulometría del sedimento tiende a ser más fina a medida que aumenta el número de días de tiempo seco. Los tamaños de partícula $<125 \mu\text{m}$ presentan la mayor tasa de acumulación en tiempo seco.

La distribución granulométrica del sedimento se encuentra influenciada por la distancia existente entre la línea de tráfico vehicular y las barreras naturales o artificiales construidas sobre la vía. Igualmente, Deletic y Orr (2005) notaron que la distribución granulométrica depende principalmente de la posición a través de la calzada y, que el d_{50} de las muestras disminuye a medida que la distancia entre el bordillo y el lugar de muestreo aumenta.

La eficacia en la recolección del sedimento por aspiración crece con el diámetro de la partícula. El modelo de regresión que produce los mejores resultados es el de tipo potencial ($R^2=0,92$).

Lavado del sedimento

Cargas

Parte de la carga total acumulada sobre la superficie es lavada durante los eventos de lluvia dependiendo de factores como la altura total de precipitación y el período previo de tiempo seco. La función exponencial es la que mejores resultados arroja.

La pendiente en tiempo de lluvia, en vías de similares características, influye en la distribución de las cargas remanentes sobre la misma. La pérdida de sedimento (carga total) en la calzada de la zona de menor pendiente (0,2%) está entre el 1-1,20-3%, y entre el 1,37-4% para la zona de mayor pendiente (4%).

Granulometría

La probabilidad de que una partícula sea transportada por la escorrentía aumenta a medida que disminuye su diámetro y crece la pendiente. Los resultados sugieren que los tamaños de partícula que presentan mayor susceptibilidad al lavado en el presente estudio son los $<500 \mu\text{m}$. Stahre et al. (1990) hallaron que sólo el 30% de todos los SST en peso presentes en el agua de escorrentía tienen diámetros de partícula $>31 \mu\text{m}$, y un 93% $<45 \mu\text{m}$. Finalmente, la granulometría de la carga total tras los eventos de lluvia tiende a ser más gruesa.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo financiero de la Agencia Española de Cooperación Internacional y la Universidad de Cantabria.

Bibliografía

- American Public Works Association, Water Pollution Aspects of Urban Runoff, Water Pollution Control Research Series WP-20-15, Federal Water Pollution Control Administration, Chicago, USA, 1969.
- ASCE, Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems, Manuals and Reports of Engineering Practice, Alexandria, Manual of Practice FD-20, 1992.
- Asplund, R., Mar, B., Ferguson, J., Total Suspended Solids in Highway Runoff in Washington State, Environmental Engineering, Vol. 108, 1982, pp. 391-1393.
- ASTM, Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2000.
- Ball, J. E., Jenks, R., Aubourg, D., An Assessment of the Availability of Pollutant Constituents on Road Surfaces, Science Total Environmental, Vol. 209, 1988, pp. 243-254.
- Barkdoll, M. P., Overton, D. E., Betson, R. P., Some Effects of Dustfall on Urban Stormwater Quality, Water Pollution Control Federation, Vol. 49, 1977, pp. 1976-1984.
- Berhanu, M., Bruen, M., Higgins, N., Johnston, P., Highway runoff quality in Ireland, Environment Monitoring, Vol. 9, 2007, pp. 366-371.
- Cole, R. H., Frederick, R. E., Healy, R. P., Rolan, R. G., Preliminary Findings of the Priority Pollutant Monitoring Project of the Nationwide Urban Runoff Program, Water Pollution Control Federation, Vol. 56, 1984, pp. 898-908.
- Collins, P. G., Ridgway, J. W., Urban Storm Runoff Quality in Southeast Michigan, Environmental Engineering, Vol. 106, 1980, pp. 153-162.
- Debo, T. N., Reese, A. J., Municipal Storm Water Management, Lewis Publishers, Florida, 1995.
- Deletic, A., Orr, D., Pollution Buildup on Road Surfaces, Environmental Engineering, Vol. 131, 2005, pp. 49-59.
- Dempsey, B. A., Tai, Y. L., Harrison, S. G., Mobilization and Removal of Contaminants Associated with Urban Dust and Dirt, Water Science Technology, Vol. 28, 1993, pp. 225-230.
- Deutsch, J. C., Mémento sur L'Evacuation des Eaux Pluviales, La Documentation Française, Ministère de L'Architecture et de L'Urbanisme, Paris, 1989.

- Ellis, B. J., Revitt, M. D., Incidence of Heavy Metals in Street Surface Sediments: Solubility and Grain Size Studies., *Water Air Soil Pollution*, Vol. 17, 1982, pp. 87-100.
- Grottker, M., Runoff Quality from a Street with Medium Traffic Loading., *Science Total Environmental*, Vol. 59, 1987, pp. 457-466.
- Habibi, K., Characteristics of Particulate Matter in Vehicle Exhaust., *Environmental Science Technology*, Vol. 7, 1973, pp. 223-234.
- Huber, W. C., Dickinson, R. E., Storm Water Management Model Version 4, User's Manual., EPA-600/3-88-001a, U. S. EPA, Atenas, Grecia, 1988.
- ISO., International Organization Standardization., *Standards Handbook*, 2000.
- Kobringer, N. K., Geinopolos, A., Sources and Migration of Runoff Pollutants., U. S. Dept. of Transport., Research Report 3, Washington, D.C., 1984.
- Malgrat, P., Panorámica General de la Escorrentía de Aguas Pluviales como Fuente de Contaminación. Actuaciones Posibles., *Jornadas Técnicas sobre la Calidad de Aguas e Impacto en Medios Receptores por Vertidos Procedentes de Drenajes Urbanos y Agrícolas*, Diputación Provincial, University Jaume I, Castellon, España, 1995.
- Manning, M. J., Sullivan, R. H., Kipp, T.M., Nationwide Evaluation of Combined Sewer Overflows and Urban Stormwater Discharges. Vol. III: Characterization of Discharges., US EPA-600/2-77-064c, US EPA, Cincinnati, USA, 1977.
- Novotny, V., Diverse Solutions for Diffuse Pollution., *Water Quality International*, Vol. 1, 1994, pp. 24-31.
- Pitt, R., Demonstration of Nonpoint Pollution Abatement through Improved Street Cleaning Practices., US EPA-600/2-79-161, US EPA, Cincinnati, USA, 1979.
- Sartor, J. D., Boyd, G. B., Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants., EPA-R2-72/081, Washington, D.C., 1972.
- Sartor, J. D., Boyd, G. B., Agardy, F. G., Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants., *Water Pollution Control Federation*, Vol. 46, 1974, pp. 458-467.
- Shaheen, D. G., Contributions of Urban Roadway Usage to Water Pollution., U. S. EPA-600/2-75/004, U. S. EPA, Washington, D.C., 1975.
- Stahre, P., Urbonas, B., Stormwater Detection. For Drainage, Water Quality and CSO Management., Prentice Hall Inc., New Jersey, 1990.
- Temprano, J., Tejero, I., Detention Storage Volume for Combined Sewer Overflow into a River., *Environmental Technology*, Vol. 23, 2002, pp. 663-675.
- U. S. EPA., Handbook: Urban Runoff Pollution. Prevention and Control Planning., Office of Research and Development Center for Environmental Research Information, EPA/625/R-93/0004, Cincinnati, 1993a.
- Valiron, F., Tabuchi, J. P., Maitrise de la pollution urbaine par temps de pluie., Tec & Doc-Lavoisier, Paris, 1992.
- Vaze, J., Chiew, H. S., Experimental Study Pollutant Accumulation on an Urban Road Surface., *Urban Water*, Vol. 4, 2002, pp. 379-389.
- Viklander, M., Particle Size Distribution and Metal Content in Street Sediments., *Environmental Engineering*, Vol. 124, 1998, pp. 761-766.
- Whipple, W., Storm Water Management in Urbanizing Areas., Prentice Hall Inc., New Jersey, 1983.
- Zafra, C. A., Temprano, J., Tejero, J. I., Contaminación por Escorrentía Superficial Urbana: Metales Pesados Acumulados sobre la Superficie de una Vía., *Ingeniería e Investigación*, Vol. 27, No. 1, 2007, pp. 4-10.